

浅谈地埋管地源热泵系统在广西的推广应用

尹锦艳 梁海嵘

摘要：根据实际调研资料，分析了地埋管地源热泵系统在广西推广应用的效果及存在的问题，给出了在广西合理推广应用地埋管地源热泵系统的建议。并通过模拟计算进一步分析了不同情况的单一长时间取热对土壤温度场造成的影响，从而说明地埋管地源热泵系统在广西的推广应是有前提条件的。

关键词：地埋管地源热；应用效果；土壤热平衡

1 引言

地源热泵系统是随着全球性的能源危机和环境问题的出现而逐渐兴起的一项热泵技术，由于其清洁、环保、高效、节能等优点，近年来，在国内外倍受重视。在广西，地源热泵系统也作为政府重点推广的节能技术之一，得到大力推广。表 1 为笔者收集整理的截止 2012 年 10 月，全区各主要城市使用地源热泵系统的概况：

表 1 广西各地地源热泵项目情况统计

	南宁市	桂林市	柳州市	钦州市	梧州市	百色市	来宾市	
	项目数	项目数	项目数	项目数	项目数	项目数	项目数	总计
地埋管地源热泵	29	6	4	8	3	0	1	51
地下水地源热泵	4	2	4	0	10	0	0	20
地表水地源热泵	7	11	1	0	2	1	1	23
总计	40	19	9	8	15	1	2	94

表 1 显示，广西地源热泵项目中，地埋管地源热泵系统约占 50% 以上，远高于文献[3]给出的 2009 年全国地埋管地源热泵系统占地源热泵系统总数 34% 的值。可见，在广西大力推广应用地源热泵系统的过程中，地埋管地源热泵系统的发展相比较其他形式的地源热泵系统而言，应用步伐更为快速。但是在数量增加的同时，已投入使用多年的项目应用情况如何？质量是否还能满足当初的设计要求？都有待深入研究，并归纳总结成败经验，加以改进和提高，以确保该项技术在广西的长足健康发展，充分发挥其环保、节能的优点，避免不合理的开发应用带来的环境破坏和热泵系统无法正常运行等不良情况的发生。

2 地埋管地源热泵系统在广西实际应用分析

2.1 广西实际投入使用的地埋管地源热泵系统的应用效果

广西地源热泵技术的应用中地埋管地源热泵系统占 54%，这个比例较全国地埋管地源热泵应用比例高出很多，究其原因，是因为广西地源热泵技术的发展还属于推广阶段，受政策影响较大，地埋管地源热泵系统相对于地表水地源热泵系统、污水地源热泵系统等必须靠近水源这一前提来说，只要有足够的埋管面积，可实施条件相对容易满足，在政府政策的鼓励推动下，地埋管地源热泵的发展必然较其它形式地源热泵迅速。根据笔者收集的资料显示，地埋管地源热泵系统的应用主要集中在政府调控力度较大的单位，如：医院、学校、政府机关住宅楼等。这些单位更关注项目产生的社会效益和节能效益。而对初投资控制较为严格、政府调控力度较小的酒店等项目地埋管地源热泵系统的使用率相对较低。

广西大部为夏热冬暖地区，夏热冬暖地区由于夏季供冷负荷远高于冬季供暖负荷（根据设计经验，南宁市冬季供暖负荷一般是夏季供冷负荷的四分之一至三分之一），故地埋管地源热泵系统设计时候均应以热负荷为地能井设计依据，多余的夏季排热应耦合冷却塔或回收利用，不应直接排入地能井。从用能情况看，广西地埋管地源热泵系统在医院、宾馆等建筑中使用效果较好，这是由于这类建筑常年需要供热水，冬夏需要空调，基本可以保证全年向土壤的排热量接近平衡，比较容易保证全年土壤热平衡。

笔者从全区地埋管地源热泵系统项目中选取了 6 项进行实地调研，调研项目主要涉及学校和住宅。理论上，学校的用能特点也容易达到土壤热平衡。实际调研结果显示，广西多个学校地埋管地源热泵系统的设计也充分考虑到了土壤热平衡问题，基本都是食堂、图书馆等集中空调供冷与学生宿舍供应热水相结合。如广西民族大学相思湖学院地源热泵项目即是将全校的集中空调和学生宿舍的热水相结合的典型范例。该系统 08 年投入使用至今运行效果较好，据现场管理人介绍，2010 年 12 月 28 日对系统进行能效测算，测算结果为：系统制热能效比 3.72，机组制热能效比 4.55。

但调研同时发现，部分项目设计和实际运行不一致，设计充分考虑了冷热平衡的问题，但由于现场管理的缺陷，实际运行中，夏季空调排热全部用以制备生活热水，学生宿舍用不完的多余生活热水直接排放，而不是将多余的夏季排热补

充给地能井，地能井仅用于冬季取热供热水。这样不仅夏季造成水资源和能源的浪费，还导致了地能井全年仅取热，不补热状况，使系统冬季供热效率严重下降，有的项目甚至运行几年后不得不增加地能井，以满足学生宿舍的冬季热水需求。

还有部分学校建筑并未将地埋管地源热泵系统供热水和集中空调供冷结合，地埋管地源热泵系统仅用于制备学生宿舍的生活热水。此类项目的设计和管理者，大多持有单一取热的地埋管地源热泵系统通过间歇运行能使土壤恢复热平衡的观点，特别是认为对于南宁市这样的土壤含水率高，地表水渗流速度大的地区，可以有效降低冷热堆积现象，基本不用考虑土壤的冷热平衡问题。由于调研的此类项目运行时间都不长，基本为 2008 年以后才投入使用，目前机组运行效率仍然能达到要求，较常规系统节能，但由于运行时间还较短，并不能充分说明土壤热平衡是否真能通过间歇运行来实现，这一观点的可靠性还有待进一步的跟踪考证。但实际调研也发现，有个别运行较早的项目运行至今已经出现制热量满足不了要求的情况，例如 2002 年开始投入使用的南宁市某中学学生宿舍地源热泵供热水项目，目前已经满足不了学生宿舍热水需求，供应热水时间和供热水质量都明显不如设备刚开始投入使用的时候。其原因一方面是由于系统运行将近十年，运行管理跟不上，设备老化，设备故障增多，另一方面，笔者认为也存在土壤因为长期仅取热不补热，造成土壤温度下降从而使设备运行效率降低的可能性。

地埋管地源热泵系统在广西居住建筑中的应用基本是以单一供应生活热水为目的的。笔者实地调研了三个土壤源供热水的住宅项目。其中一个耦合了住宅小区旁边的酒店空调系统，系统运行工况和用能状况较为复杂，热水供应能满足需求。另一个运行一年后由于地埋管地源热泵系统满足不了热水需求而增加了空气源热泵辅助加热。据管理员介绍，这主要是由于住户的用水量远超过设计用水量造成的，地埋管地源热泵系统运行状况良好。第三个项目 2010 底才投入使用，运行状况良好。但该项目施工中热水管道保温施工不到位，用户用热水前要排掉大量储存于水管中的冷水，造成水资源的浪费。

另外，通常情况下，地表以下 20 米深以内为变温层，其温度随地表温度的变化而波动，波动幅度随深度而衰减，至 20 米左右基本不随气温的季节变化而波动，在这之下至 200 米左右为恒温层，其温度基本保持恒定，不随季节波动，其温度值与当地气温年平均值大致相当。但调研中发现，广西部分地埋管地源热泵

系统项目垂直埋管深度仅 25 米左右，25m 处于变温层与恒温层的交界，大部分埋管其实受气温波动影响较大，难以真正发挥地源热泵的优势。且埋深过浅，会造成埋管面积的浪费。

2.2 广西实际投入使用的埋管地源热泵系统总体存在的问题

根据笔者收集的 50 多个埋管地源热泵系统项目资料及现场调研的典型项目显示，全区埋管地源热泵系统项目使用普遍存在以下问题：

（1）前期准备工作的不足

根据《地源热泵系统工程技术规范》GB50366-2005（2009 版）规定“当地埋管地源热泵系统的应用建筑面积在 3000~5000 m²时，宜进行岩土热响应试验；当应用建筑面积大于等于 5000 m²时，应进行岩土热响应试验。”但笔者共收集了广西全区各地 50 多个埋管地源热泵系统项目的基本信息，所收集到的项目仅个别项目进行了热响应试验。

另外，根据规范要求，埋管地源热泵系统系统设计前，应根据工程勘察结构评估埋管换热系统实施的可行性及经济性。但实际调研结果也发现，广西区内的埋管地源热泵系统项目系统设计前，很多项目没做过仔细的可行性和经济性分析。

（2）设计方面的问题

在设计中，部分项目不是按照实地勘察所得的地勘资料进行设计，而是以口传或者相邻项目的地勘资料为设计依据。

另外，在设计的时候不注意考虑全年冷热平衡问题，因此在大面积埋管的大型工程中往往导致地下换热器系统的实际换热能力与装机容量、建筑物排入土壤的瞬时冷/热负荷和积累量不匹配，使得地温逐年升高或者下降，系统的供热供冷能力因而逐年下降。这在地下水流速偏低的地区、埋管数量大的、冷热负荷差别大的项目中问题尤其突出。

（3）施工方面问题

目前普遍存在的施工问题是专业的垂直埋管地下换热器系统施工队伍数量不足，施工缺乏相关的工艺规程，缺乏有力的监管控制。

（4）后期运行监测问题

调研发现，广西大部分项目缺乏土壤监测设施，很少有项目关注项目运行过

程中埋管地源热泵系统对土壤温度场的影响。另外，也很少有项目监测记录埋管地源热泵系统的运行能效参数。

综上，由于缺乏详细的可行性和经济性分析、土壤热平衡模拟计算，土壤源温度变化监测等措施，广西埋管地源热泵系统项目的使用存在一定的盲目性，某些项目运行至今，已经出现严重满足不了设计要求的情况。更为严重的是，由于这些项目未设任何土壤源温度的监测点，项目运行对土壤温度的影响状况不明，长期向土壤排热取热使土壤温度的变化对设备运行能效的影响不明，很难为埋管地源热泵系统在广西的应用提供实践经验和理论指导。

2.3 广西埋管地源热泵系统的应用建议

由 2.1 及 2.2 节描述可见，埋管地源热泵系统在广西的应用不乏成功的案例，但也不可忽视失败案例中暴露的问题，在埋管地源热泵系统推广使用的工程中，应采取以下措施：

(1) 必须采用成熟的模拟软件进行埋管换热器设计计算。目前多数设计者采用打试验井进行排热和吸热实验的方法来获得单位长度埋管的换热能力，以此确定总理管长度的方法是不准确的。由于做实验的时候地层处于原始温度，此时测得的无论是排热还是吸热的能力都是偏大的。一般建筑项目的供冷或供热峰值都发生在供冷或供热进行了几个月后。供冷期管壁周围的地温会比原始地温高好几度，而在供暖期管壁周围的地温会比原始地温低好几度，所以在供冷和供热高峰期换热管的单位长度排热和吸热能力都大大下降。采用这种设计方法，最后会导致机组出力不足且电耗增加。

由于埋管的换热能力与前期吸排热的积累量密切相关，国内外已开发了一些成熟的埋管换热器设计计算软件，可以避免盲目粗略估算带来的失误。这些软件可以根据当地的埋管形式、地下岩土的热物性、地下原始温度和建筑的动态冷热负荷的情况作详细的计算，从而来确定适合的埋管长度。工程前期打试验井孔的目的应是获取地层的导热系数、原始地温以及地下水流动的情况，为模拟计算提供正确的输入参数。而传统采用的只计算建筑物峰值冷热负荷的方法也不适用于地源热泵系统设计，必须通过建筑全年动态热模拟来获得全年冷热负荷。

(2) 受具体地理环境限制，广西大部地区夏长冬短，夏季供冷量远大于冬季供暖量，对于埋管地源热泵系统难以解决热平衡问题，且对土壤层热物性的

基础研究不足，设计参数准确度难以得到保证，因此广西地区在采用地埋管地源热泵系统时需谨慎对待。除了在选择时应保证具有正确可靠的技术数据和成熟的设计计算方法以外，还可以采用混合系统，保证地下换热器部分能够达到冷热平衡，以制冷为主的空调热水系统应按供热负荷进行设计，不平衡部分由增设的冷却塔以排除多余的热量；以制热为主的空调热水系统可采用辅助锅炉、太阳能热水系统等方法补充热的不足。在运行过程中，实时计量进入地下的热量和取出的热量，及时利用上述补充手段来进行调控，以保证排入地下的冷热量尽量平衡，缓解土壤总体热失衡问题。

(3) 回填是施工过程中影响最终质量的关键。目前我国绝大多数地埋管地源热泵系统工程在下管之后采用的是从上往下灌入回填料的方式。这种方式很可能导致回填料中间存在气隙而降低了回填料的实际导热系数，使得换热管的传热能力下降。最好的施工方法是采用反浆回填方法。这是一种用高压泵把回填料压入伸到井底的管子中，使回填料从井底向上溢上来的方法，避免回填料中存在气隙。最后，引导管就留在井中。这种方法的成本要高于普通的从上往下的回填方法。

(4) 地埋管地源热泵系统在广西的应用监管力度需加强，新建项目需经过详细的可行性和经济性论证，需严格按照规范做好相关的监测、实验、平衡计算等，且新建项目中还应该设有土壤监测系统，随时监测土壤温度变化，有利于及时发现和处理问题，也可为后建的项目提供数据支持。

3 地埋管地源热泵系统与土壤换热情况的模拟分析

广西应用最多的地源热泵形式为地埋管地源热泵系统，而地埋管地源热泵系统能否成功运行，其重点和难点为地埋管换热器的设计，故本节通过“地热之星”软件模拟对地埋管换热器与土壤换热进行分析。应特别说明的是，“地热之星”模拟软件并没有考虑地下水渗流对地埋管换热器换热的影响。实际设计中应充分重视地下水渗流的影响，避免使地埋管长度设计过长，造成不必要的浪费。

地下水渗流对土壤换热器与土壤换热的影响极为复杂，目前国内外关于地下水渗流对地埋管换热器与土壤换热的理论研究不多。国外（Bear 1972，Domenico&Schwartz 1990）用Pe数作为地下水流动影响的判别条件。Pe数的值在0.4~5之间，地下渗流中既有热传导的作用，又有热对流的作用；而当 $Pe > 5$ 时，

主要是热对流来进行热传递。在实际工程中， $Pe > 1$ 时才考虑地下水渗流对地下环路热交换器设计的影响。

Pe 数(Peclet Number)是在进行地下环路热交换器的设计时，判别是否应考虑地下水渗流影响的条件，它的物理意义是表示在地下水渗流中热对流强度与热传导强度的对比关系。

根据 Pe 数公式及笔者收集到的广西体育中心二期体育馆及游泳跳水馆的地勘资料数据计算，两个馆的 Pe 数值如下表：

表 2 水流速度及 Pe 数

建筑物名称	水流速度(m/d)	Pe 数
体育馆	0.0165	1.22
游泳跳水馆	0.0017	0.25

可见体育馆对应的地下埋管土壤渗水性好，地下水的渗流对地埋管的换热和土壤的热平衡有利，实际设计中应予以考虑。而游泳跳水馆对应埋管土壤的 Pe 数极小，土壤中的换热主要以导热为主，几乎可以不考虑地下水渗流对流换热的影响，对待这样的土壤条件，土壤热平衡问题要极为重视，避免长时间单一取热或放热，导致土壤温度升高或降低，而引起环境问题和设备效率低下。

由体育中心案例可见，广西并不是都为富水土壤、渗流影响极大的情况，研究无渗流时地埋管换热器温度场的响应仍然有意义。故以下不考虑地下水渗流的影响，着重模拟不同情况的单一取热对土壤温度场的影响。

假设累计向土壤取热量相同，仅是间歇时间不同，则不同运行情况地埋管地源热泵系统运行多年后对土壤温度场的影响如图 1~3。图中运行时间单位为月。

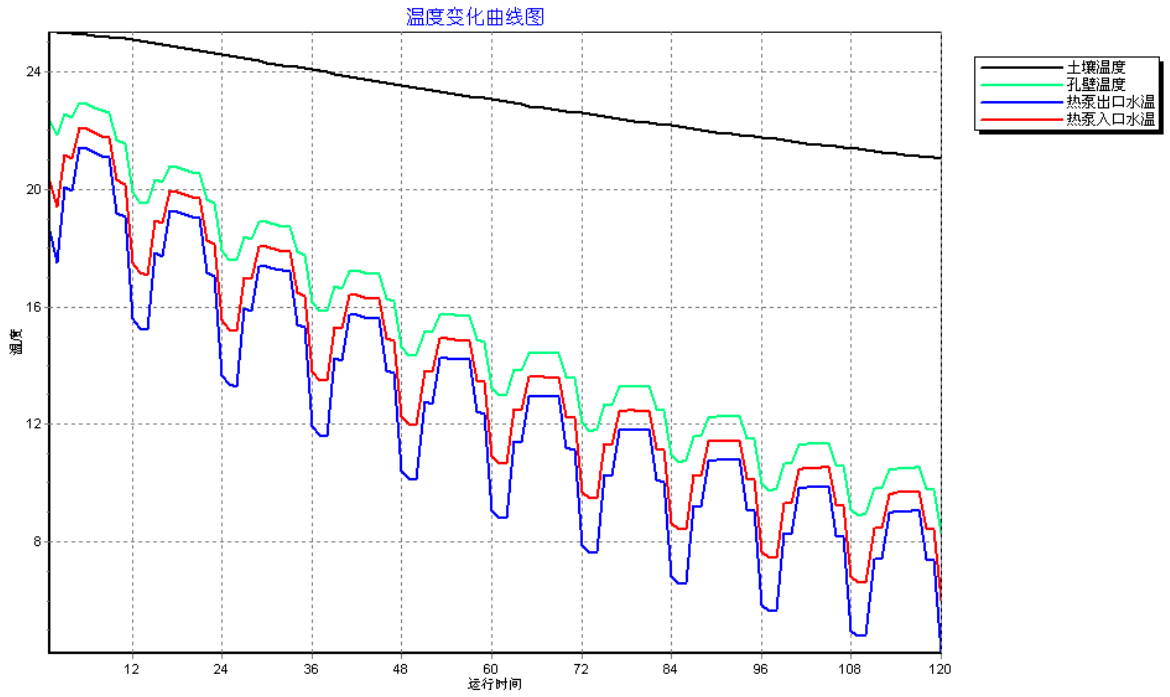


图1 全天12h间歇取热地埋管换热器相关温度变化曲线图

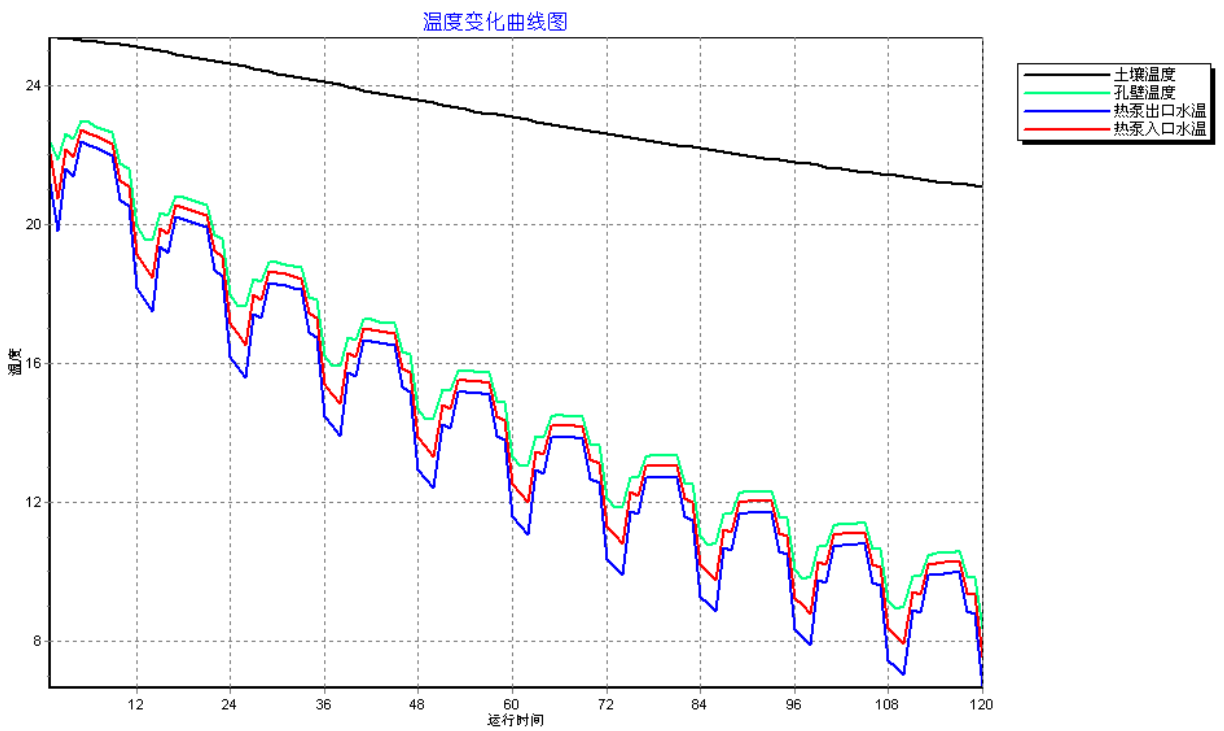


图2 全天24h均匀取热地埋管换热器相关温度变化曲线图

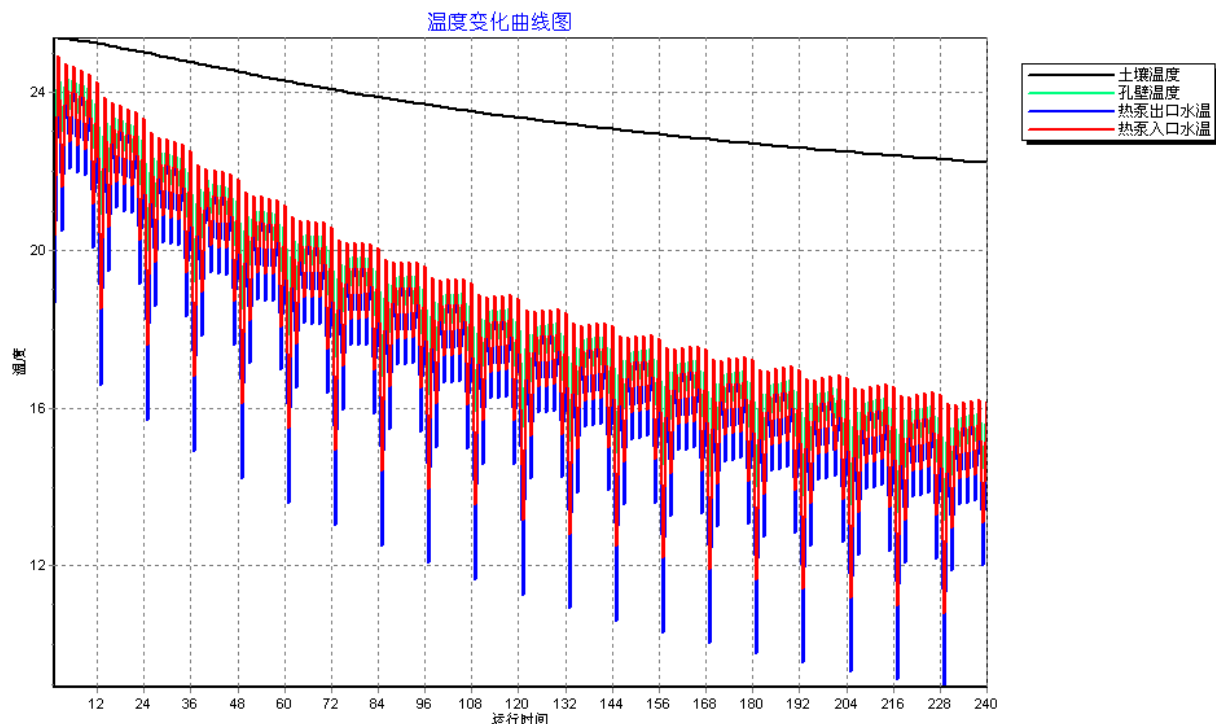


表3 全年按月间歇取热地埋管换热器相关温度变化曲线图

由图1~图3可见，单一取热的地源热泵，无论其运行方式如何，常年取热的结果必然是土壤温度逐年降低，最终导致土壤源热泵无法运行。地埋管换热器一般置于恒温带内，恒温带温度是地球表面的太阳照射与气温影响和地核的导热与对流影响的综合平衡点。如果短时间内，把恒温带地层看作为“取之不尽，可不断再生的低温地热资源”，可由地热资源或地表太阳能来补充，那就会犯原理性错误。由于地壳的导热系数很小，热容量极大，若要让地表太阳照射的热能或地幔的热能传递到此恒温带，其恢复温度的时间跨度将是几十年，乃至上百年。因此，单纯地、连续地从恒温带取热而不考虑及时的热量平衡，恒温带的温度必然会逐年下降，使地源热泵系统的工况逐年恶化，效率逐年下降，最终完全失效与报废。所以，我们不应该把恒温带看作取之不尽，可不断再生的低温地热资源，或许只能将它理解为“蓄热层”。

由图1、2出，全年单一取热的地源热泵，无论是全天仅运行12h（峰值负荷大）还是全天24h运行（峰值负荷小），地埋管孔壁月平均温度及距离钻孔群5米处土壤平均温度均逐年下降，热泵入口温度也在逐年下降。且在累计取热量一定的前提下，两种情况使地埋管孔壁月平均温度及距离钻孔群5米处土壤平均温度变化基本一致。这一现象说明，短期的间歇负荷的输入与总量相等的均匀负荷

输入对土壤温度场的作用效果相当。究其原因是因为土壤的导热系数极小，土壤相当于一个大的蓄热体，土壤的冷热量的释放时间远超过设备间歇运行的几个小时，上一个运行时段取走的热量还未得到补充，或者仅得到了及少量少到几乎可以忽略的热量补偿，下一个运行时段已经开始了，所以长时间来看，这种短时间间歇运行的负荷状况对土壤热恢复没有多少作用，其对土壤温度场的影响与连续均匀的冷负荷输入一致。

两个模拟图对比可以看出，全天运行12h的情况下输入热泵入口温度的极值与地埋管孔壁温度温差较大。这个不难理解，这两种工况除运行时间（峰值负荷）外，其它运行条件完全一致，故间歇运行时，短时间内热泵取热量大，在循环水量相等的情况下，热泵出口水温低，进入地埋管循环换热的水温低，经过地埋管循环换热后的水温（即热泵入口水温）也较低。另外，水的导热系数也是随着温度的降低而降低的，循环水温降低也会在一定程度上减弱水与地埋管孔壁的换热能力，从而加大循环水与地埋管孔壁的温差。

因此，可以把短时间间隙工作的周期性脉冲热流简化为一个持续作用的平均热负荷和一个脉冲负荷的和，地埋管换热器中流体温度的升高不仅取决于长期的平均负荷，也与短期的脉冲负荷强有关。如果单一长期取热，在全年取热量一定的前提下，地埋管地源热泵系统承担长期均衡负荷的能力较好，短时间的强负荷有可能使换热器内流体的温升达不到热泵额定的进水温度，这一点设计时应加以注意。

图3间歇运行与图1间歇运行对土壤温度场产生的影响不同，图1负荷间歇为短时间数小时的间歇，图3长达一个月的间歇，数小时的间歇时间对土壤热恢复影响甚微，几乎可以忽略，而有足够长的间歇时间土壤温度场的自身恢复能力就比较明显。

由图1~3可得，土壤自身有恢复能力，可以在一定程度上抵御冷热失衡，但是这种恢复能力有限，土壤自身的热恢复所需的时间极长，短时间数小时的恢复时间远满足不了要求。如希望热泵能实现较长时间单一取热运行，则两个取热周期内的间歇期要上月甚至是数月才能对土壤的热恢复起到明显的作用。

综上，无论其运行方式如何，对于渗流作用小的土壤，常年取热的结果必然是土壤温度逐年降低，最终导致地埋管地源热泵系统无法运行。土壤源温度降

低的速度与从土壤取热的强度、取热持续的时间及取热的时间间隔有关。从理论上来说，渗流作用不大的土壤，不应该设计为单一取热的运行模式。如非要设计为单一取热的运行模式，则可以考虑在低负荷季节，按月轮换使用地埋管，使不同地埋管区域的土壤温度得到一定的恢复，从而尽可能延长地埋管地源热泵系统使用时间。

4 结语

地埋管地源热泵系统并不是放之四海而皆准的实用技术，它的使用必须满足一定的条件。

地埋管地源热泵系统实施必须以真实可靠的项目现场水文地质勘察资料为前提，在真实可靠的地勘资料基础上根据项目的实际情况进行可行性分析。且地埋管地源热泵系统在广西的应用必须确保全年向土壤的取、放热量达到平衡。单一以供应热水为目的的住宅或以制冷空调为主的建筑地埋管地源热泵系统的使用需与其它互补的技术结合。若项目真的需要使用地埋管地源热泵系统单一从土壤取热或释热，项目实施前必须提供确切的地勘资料证明地埋管场地土壤含水率足够高，地下水渗流速度足够大，能够自身解决土壤热失衡问题，并且还要提供可靠的地源热泵长期运行的土壤温度场变化模拟数据证明土壤不存在热失衡问题，方可考虑实施。

[参考文献]

- [1] GB 50366-2009, 地源热泵系统工程技术规范[S].
- [2] DB45/T586-2009, 地源热泵系统工程技术规范[S].
- [3] 徐伟. 地源热泵技术手册 2011[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2011;
- [4] 马宏权、龙惟定. 地埋管地源热泵系统的热平衡[J]. 暖通空调, 2009, 39(1)102-106.
- [5] 刘晓茹. 地埋管地源热泵系统热平衡及其地域性分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(9)57-59.
- [6] 汪训昌. 关于发展地源热泵系统的若干思考[J]. 暖通空调, 2007, 37(3)38-43.
- [7] 方肇洪、刁乃仁. 地热换热器的传热分析[J]. 建筑热能通风空调, 2004,

23(1)11-20.

[8] 胡映宁, 林俊, 尹向明. 富水土壤地区土壤换热器换热性能的实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(1)5-11.

[9] 王艳霞, 蒋绿林, 高伟. 地源热泵长期运行对生态环境的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24)10671-10672.

[10] 崔萍、刁乃仁、方肇洪. 地热换热器间歇运行工况分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 16(1)52-57.

[11] 马宏权、龙惟定. 地埋管地源热泵系统的实施前提[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(1)57-59.

[12] 王庆鹏. 地下水渗流对地源热泵影响的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007